

К. К. Климов, Е. Ф. Лизунова, Б. Э. Любомудров, М. А. Безматерных,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

ОБЗОР ПОТЕНЦИАЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОСЛЕЙ КАК АГЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ

The article is devoted to consideration of the problem of biogas purification as of the main factor holding back the growth of the biogas industry. The advantages and prospects of using *Chlorella vulgaris* in the context of the possibility of using it for biological purification of biogas from CO₂ have been evaluated. A scheme for purifying biogas from CO₂ using microalgae is proposed.

В настоящее время биогаз – почти совершенное топливо, он является лучшим из всех видов биотоплива с точки зрения круговорота углерода в природе и имеет самый высокий выход экологически чистой энергии, абсолютно не зависящей от рынка природного газа, угля и нефти [1, 2]. Энергия, заключенная в 1 м³ биогаза (20–25 мДж), эквивалентна энергии 0,6 м³ природного газа, 0,74 л нефти или 0,66 л дизельного топлива. Соотношение CH₄ и CO₂ зависит от исходного субстрата и характеристики процесса брожения (температуры, времени пребывания массы в реакторе и загрузки его рабочего пространства) [3]. В результате брожения из 1 т органического вещества (по сухой массе) получается 350–600 м³ биогаза, при этом КПД превращения энергии органических веществ в биогазе равен 80–90 % [4].

Биогаз состоит в основном из метана (CH₄) 40–75 % и диоксида углерода (CO₂) 15–60 %. Следовое количество других компонентов, таких как вода 5–10 %, сероводород (H₂S) 0,005–2 %, силоксаны 0–0,02 %, галогенированные углеводороды (VOC) < 0,6 %, аммиак (NH₃) < 1 %, кислород (O₂) 0–1 %, оксид углерода (CO) < 0,6 % и азот (N₂) 0–2 % [5].

Низшая теплота сгорания топлива зависит от процентного содержания метана в смеси. Однако помимо уменьшения содержания теплотворного метана, уменьшение мощности двигателей внутреннего сгорания обеспечивается увеличением количества воздуха, приходящегося на 1 кг метана, и появлением большого количества балластного газа (CO₂) в зоне горения топлива, что также приводит к ухудшению процесса сгорания [6].

К тому же уменьшение содержания метана в топливе приводит к ухудшению условий сгорания топлива (увеличиваются выбросы несгоревших углеводородов) и снижению максимальной температуры данного процесса и приводит к увеличению выбросов CO на режимах максимальных нагрузок. Это является следствием того, что увеличенное количество CO₂ в топливовоздушной смеси снижает долю воздуха в ней, приводя к снижению низшей теплотворной способности [6].

Высокие концентрации CO₂ также делают биогаз более дорогим, чем ископаемый природный газ, для процессов сжатия и транспортировки [7]. Следовательно, необходимо проводить процессы улавливания CO₂, чтобы продукт облагораживания биогаза использовался в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин и топливных элементов, а также в качестве исходного материала для производства водорода и других ценных материалов [8].

Введение новых технологий очистки биогаза – путь оптимизации производства для данного вида биотоплива. Обогащение биогаза до биометана подразумевает удаление сероводорода (H₂S), диоксида углерода (CO₂) и воды.

Проблема содержания влаги в биогазе более чем актуальна. Ее удаление из биогаза совершается механическим путем, а также за счет снижения температуры. Процесс извлечения лишней влаги из биогаза достаточно трудоемкий и сложный.

В отличие от удаления из биогаза сероводорода, углекислоту отделить не так легко и дешево. Считается, что ее можно отделить, впитав в известковое моеко. Но, как показывает практика, это может привести к появлению большого количества извести, что является негативным фактором.

Внимание ученых сегодня привлекают биологические методы очистки биогаза от CO₂ с использованием микроводорослей.

По сравнению с высшими растениями и животными, микроводоросли обладают такими преимуществами, как высокая скорость роста, использование территорий, не подходящих для сельского хозяйства, и возможность

стимулировать культивирование для производства различных соединений (*Babu & Rajasek-aran, 1991*). Микроводоросли фиксируют CO₂ с большей скоростью, чем наземные растения, так что содержание CO₂ в биогазе может быть эффективно использовано для производства биомассы с высокой плотностью [9].

Хлорелла является быстро размножающейся микроводорослью, которая за сутки увеличивает свою биомассу в 5 раз. Этот эффект объясняется тем, что она поглощает много углекислого газа и, соответственно, выделяет много кислорода [10]. Хлорелла является одним из самых перспективных штаммов в области поглощения углекислого газа, многие страны ведут разработки фотобиореакторов с *Chlorella Vulgaris* позволяющих поглощать в 400 раз больше углекислого газа, чем наземными растениями, которые занимают ту же площадь.

Хлорелла – активный продуцент белков, углеводов, липидов, витаминов. Соотношение этих соединений легко регулируется при изменении условий культивирования: если при выращивании на обычных минеральных средах в ее сухой биомассе содержится 40–55 % белка, 35 % углеводов, 5–10 % липидов и до 10 % минеральных веществ, то при изменении концентрации компонентов среды можно получить биомассу следующего состава: 9–88 % белка, 5–86 % липидов, 6–38 % углеводов. Хлорелла, растущая на среде, богатой азотом, накапливает преимущественно белок, при дефиците азота она синтезирует, главным образом, жиры и углеводы, добавление к среде глюкозы и ацетата приводит к повышению содержания каротиноидов и т. д. При азотном голодании процентное содержание липидов может достигать 80 % [11].

Из-за полезных свойств хлореллы, ее применение в различных областях деятельности человека очень широкое:

- в сельском хозяйстве для подкормки растений, птиц и животных, в пчеловодстве и рыбном хозяйстве;
- в пищевой промышленности;
- в медицине, косметологии и парфюмерии;
- для очистки сточных вод и реабилитации водоёмов;
- для производства кислорода;

- для производства биотоплива.

Известно, что благодаря хлорелле можно добиваться:

- увеличения среднесуточных привесов при откорме крупнорогатого скота и свиней на 30–40 %, увеличения удоев коров до 25 %;
- резкого, до 4–5 раз, сокращения падежа молодняка за счет укрепления природного иммунитета животных;
- значительного продления сроков хозяйственного использования животных;
- увеличения плодовитости родительского стада, сокращения непродуктивных осеменений и сроков сервис-периода, экономии на ветпрепаратах;
- повышения усвояемости кормов, позволяющее экономить их расходование до 22 % [12].

В Японии хлореллу добавляют в хлеб, кондитерские изделия, мороженое для обогащения их питательными веществами. А добавка к десяти частям муки одной части смеси одноклеточных водорослей, в основном хлореллы, позволяет получать вареные и печеные продукты с улучшенными вкусовыми качествами и содержанием 22–29 г белка в 100 г продукта, что довольно много.

Потребность животноводства в суспензии хлореллы очень велика, так как она с успехом используется в качестве витаминно-кормовой добавки для всех видов животных: крупного рогатого скота, свиней, овец, коз, кроликов, птиц, рыб, насекомых, чернобурых лис, норок и т. д. [13].

Учитывая совокупность приведенных выше данных о положительном влиянии подкормки суспензией хлореллы на показатели продуктивности различных животных, следует признать целесообразным строительство хотя бы небольшой установки (биореактора) для выращивания хлореллы на каждом животноводческом комплексе и птицефабрике для введения в рационы кормления животных жизненно необходимых веществ, содержащихся в биомассе данной водоросли. Это позволит сократить расходы на ветеринарные

препараты, увеличит выживаемость поголовья и суточные привесы, будет способствовать получению дополнительной прибыли [11].

Авторами предложено несколько вариантов очистки биогаза, одним из самых перспективных в России является использование фотобиореакторов вкупе с метановым брожением в агропромышленных комплексах, что позволит не только получать очищенный биогаз, но и почти полностью утилизировать агропромышленные отходы, улучшая важные характеристики сельскохозяйственных продуцентов. Биопереваренные органические отходы будут использоваться, как источники питательных веществ для водорослей, а биогаз, после удаления сероводорода, снабжать биомассу углекислым газом, повышая свою низшую теплотворную способность. Суспензия выращенной хлореллы, не теряя находящиеся в среде витамины и другие биологически активные вещества, будет использоваться как биологически активная добавка для подкормки растений, птиц и животных. Еще одним вариантом является извлечение из выращенной суспензии ценных веществ, например, биодизеля, биоэтанола, биоводорода и т. д., после чего органические остатки пускать обратно на метановое брожение. Общая технологическая схема представлена на рисунке.



Рис. Схема очистки биогаза

Перед пропусканьем через систему водорослей, для недопущения их отравления, биогаз должен быть предварительно очищен от сероводорода. Самым простым методом очистки от сероводорода является адсорбционное пропускание биогаза через колонну с железной стружкой. После пропускания через десульфирующую колонну газ с помощью компрессора подается в фотобиореактор, предварительно заполненный суспензией водорослей и разбавленными органическими отходами. Проходя через суспензию водорослей биогаз очищается, снабжая культуру углекислым газом, при этом суспензия используется, как сказано выше, а очищенный биогаз может подаваться на нужды производства, в сети природного газа, либо перевозиться и продаваться в сжатом или сжиженном виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулин, М. А. Перспектива использования биометана в Оренбургской области в качестве альтернативного газомоторного топлива / М. А. Абдулин, В. Ю. Бибарсов // Технические науки. – 2015. – № 5. – С. 76–78.
2. Неджи, П. А. Биометан из биомассы как возобновляемый экологический источник топлива / П. А. Неджи, Т. Н. Нгагдже, К. А. Ибе, Э. А. Абара // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2009. – № 1. – С. 119–121.
3. Баадер, В. Биогаз: теория и практики / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер. – М.: КОЛОС, 1982. – 140 с.
4. Кириллов, Н. Г. Альтернативные виды моторного топлива из биосырья для автотракторной техники / Н. Г. Кириллов // Достижения науки и техники в АПК. – 2002. – № 2. – С. 11.
5. Andriani, D. A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas Through CO₂ Removal Using Various Techniques / D. Andriani, A. Wresta, T. D. Atmaja, A. Saepudin // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2013. – № 172. – P. 1909–1928.
6. Кузьмина, Р. С. Применение биогаза в двигателях внутреннего сгорания в РС (Я) / Р. С. Кузьмина // Материалы XIX всероссийской научно-

практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием. – 2018. – С. 94–99.

7. Khan, I. U. Biogas as a renewable energy fuel – a review of biogas upgrading, utilization and storage / I. U. Khan, M. H. D Othmanb., H. Hashima, T. Matsuurad., A. F. Ismail, M. RezaeiDashtArzhandib, I. W. Azelee // *Energy Convers. Manag.* – 2017. – № 150. – P. 277–294.

8. Zhou, K. Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO₂ capture / K. Zhou, S. Chaemchuena, F. Verpoort // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2017. – № 79. – P. 1414–1441.

9. Costa, J. A. V. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms / J. A. V. Costa, D. I. P. Lindle // *World J. Microbiol. And Biotechnol.* – 2000. – № 16. – С. 15–18.

10. Заболотских, В. В. Разработка технологических подходов к получению альтернативного биотоплива из водорослей / В. В. Заболотских, А. В. Васильев, Л. А. Сматхина, О. В. Семихвостова // *Академический вестник ЕЛПИТ.* – 2019. – № 1(7). – С. 12–38.

11. Трофимчук, О. А. Биофотонные облучательные системы для выращивания микроводорослей: дипломный проект / О. А. Трофимчук; НТУ, ИФВТ, ЛиСТ; науч. рук. А. Н. Яковлев. – Томск, 2016.

12. Арьянова, Э. Д. Культиватор для выращивания хлореллы в искусственных условиях / Э. Д. Арьянова, С. С. Иванова, О. С. Карпова и др. // *Архитекторы будущего: сборник научных трудов Всероссийской научной школы по инженерному изобретательству, проектированию и разработке инноваций*, 14–16 ноября 2014 г. – 2014. – С. 18–23.

13. Манакина, Е. Использование хлореллы в кормлении сельскохозяйственных животных / Е. Манакина, С. Мельников // *Наука и инновации.* – 2010. – № 8. – С. 40–43.